

論文の内容の要旨

論文題目 UHV 架空送電設備の雷撃被害推定に関する研究

氏名 成田知巳

本論文は、UHV 架空送電設備の雷撃被害推定に関する研究成果についてまとめたものである。架空送電線は、山間部から市街地にわたる広範な地域に施設されており、常に屋外の自然現象にさらされている。なかでも雷は電力設備にとって最大の脅威であり、供給支障を伴う事故の最も大きな原因となっている。送電線への雷撃により雷事故が発生すると、設備点検のための雷事故巡視を実施しているが、設備被害はほとんど発生していないのが現状である。この雷事故巡視の効率化を目的として、設備情報や落雷情報などを活用して、雷撃による設備被害の推定手法を構築した。

活用したデータは、架空送電設備を構成している鉄塔、がいし、電線および架空地線の種類や耐雷特性などを基本とし、雷撃を遠方から観測しその位置や電流波高値を推定できる落雷位置標定装置を用いて、設備の被害有無を推定した。

まず、設備被害の実態を調査し、架空送電設備の中で、鉄塔や電線は、その耐雷特性から雷撃による被害を受けることは無いことから、検討から除外した。次に、UHV 架空送電設備の中で最も雷撃を受ける架空地線 OPGW500mm² について、雷撃を模擬した直流アーク試験を実施し、耐雷特性を明らかにした。その結果、正極性の雷撃を除き、被害を受けにくいことから、検討から除外した。従って、架空送電設備の中で、雷撃による被害を受ける、がいしに焦点を合わせ、被害推定手法を構築した。

雷事故の際に、がいし付近でフラッシュオーバーすることから、がいし被害を精度良く分析するため、がいし間に発生する過電圧を精度良く解析することが重要である。送電設備の雷サージ解析には、EMTP が用いられているが、UHV 送電線での解析事例は少ない。そこで、南いわき幹線を対象に実雷による雷サージ解析を実施し、がいし間電圧の解析に活用できることを示した。また、送電線および変電所の間に位置する UHV 鉄構についても EMTP で解析し、がいし間電圧が求められることを示した。

次に、がいし間電圧の EMTP 解析に欠かせない遠方から雷撃を推定できる落雷位置標定装置の雷撃電流推定値および位置標定精度の評価について、実際の雷撃と比較することによりパフォーマンス検証を実施し、十分な精度で活用出来ることを示した。特に第一雷撃での電流評価は世界でも例がない。

最後に、過去のがいし被害の分析、EMTP によるがいし間電圧の解析および系統事故情報の分析により、設備被害を見逃すことがない雷撃被害推定手法を構築した。

架空送電設備への雷撃による雷事故が発生した場合には、国内の電力会社は設備の健全性確認のため、雷事故巡視を実施している。今回の研究で得られた被害推定手法は、東京電力における雷事故巡視に既に適用され、大幅な合理化に結びついている。

本論文の構成は、以下の6章からなる。

第1章「序論」では、研究の背景をなす送電設備の雷事故や設備被害の実態、雷事故巡視の考え方、送電設備の雷害対策と課題について説明し、耐雷特性の評価や被害推定手法構築の重要性について述べた。

第2章「UHV送電用架空地線 OPGW500mm²の雷撃溶損特性評価」では、OPGW500mm²の耐雷性能を評価するため、実験室での直流アーク試験を実施し、損傷の予測をするとともに機械的強度を評価した。また、実雷撃事例を示し、電荷量を推定した。

主な結果を次に示す。

- ① 直流アーク試験を実施した結果、通過電荷量と OPGW500mm²の素線溶損量との関係は、73クーロン/gとなった。また、素線1本を溶断させるのに必要な通過電荷量の下限値は、375クーロンであることを示した。
- ② 設計で想定する最大放電電荷量を IEC 62305-4 における正極性雷放電の5%値である350クーロンとし、雷撃の全エネルギーが溶断のために使われたと仮定すると、素線溶断は最大1本程度と推定された。
- ③ アークによる電線強度の低下を評価した結果、350クーロンでも安全率2.5を十分に確保できた。
- ④ UHV 架空送電線で初めての1L, 2L 同時逆フラッシュオーバー事故により架空地線である OPGW500 mm²の素線が溶損し、その重量は1L, 2Lそれぞれ0.9 g, 1.7 gであった。直流アーク試験の73クーロン/gを実雷撃の溶損量に適用すると1L, 2Lそれぞれ66クーロン, 124クーロンと推定された。350クーロンは超えてない可能性が高いが、4本の素線が損傷した。
- ⑤ 通過電荷量900Cでも OPGW500 mm²に挿入されている光ファイバには全く影響を与えず、正常に通信できる状態であった。

以上から OPGW500 mm²は、雷撃に対して十分な溶損性能を有していると判断できる。負極性雷撃の5%値である40Cに対しては、雷撃によって架空地線 OPGW500 mm², OPGW60 mm²および OPGW120 mm²の設備被害が発生することはないため、本論文における雷撃による被害推定手法の検討の対象外とする。

なお、正極性の雷撃については、素線切れや断線リスクが有ることから、第6章の被害推定において推定条件に加えることとする。

第3章「がいし間電圧の評価(その1)～UHV2回線雷事故解析事例～」では、UHV 架空送電線である南いわき幹線において初めて発生した雷撃が原因と推定される1L, 2L 同時逆フラッシュオーバー事故を EMTP により解析し、1L および 2L の架空地線2箇所には波高値265kA、波頭長2.5μs程度の雷撃が同時にあり、事故が発生したことを推定した。

主な結果を次に示す。

- ① UHV 架空送電線で行われた初めての1L, 2L 同時逆フラッシュオーバー事故により架空地線である OPGW500 mm²が損傷した。

- ② オシロ波形が観測され、1L, 2L の中相がほぼ同時にフラッシュオーバーしており、位相が 270 度付近で正極性雷撃が侵入したと推定された。
- ③ JLDN では、正極性の 265 kA 程度の電流波高値が推定された。
- ④ 184 m 離れた 2 箇所へ同時に全く独立した雷放電路が存在したとは考えにくいこと、JLDN の標定結果が 1 データしか無いことから、雷放電路上部は一つで、雷放電路下部が分岐して、1L, 2L の架空地線の 2 箇所に同時に雷撃があり、2 相の逆フラッシュオーバー事故が発生したと推定される。なお、JLDN データ及び EMTP 解析から、その雷撃電流値の総和は波高値 265 kA、波頭長 2.5 μ s 程度と推定するのが妥当である。

以上から UHV 送電線の 2 回線雷事故について、がいし間電圧を EMTP 解析することにより再現が可能であることを示した。

第 4 章「がいし間電圧の評価（その 2）～UHV 鉄構縮小モデルの雷サージ特性と EMTP モデル化～」では、UHV 鉄構の雷サージ特性を測定し、EMTP モデルを構築した。1/10 に縮小した UHV 鉄構モデルを製作し、塔頂に雷インパルス電圧を印加することにより、鉄構の電力線中央位置電圧、電力線 2L 位置電圧および地線 2L 位置電圧を測定し、鉄構の応答特性を求めた。その結果、UHV 鉄構の雷サージ特性を測定するとともに EMTP モデルを提案し、数値解析手法でも妥当性を示した。

主な結果を次に示す。

- ① 波形を再現するため、従来の 2 段モデルに水平方向の分布定数を加えたモデルを構築した。パラメータ解析を実施し、実測波形を再現できる組み合わせは、 $Z_1=220 \Omega$ 、 $Z_2=220 \Omega$ 、 $Z_3=140 \Omega$ となった。
- ② 鉄構モデルに従来の 2 段モデルの最大値は 2,635 kV であるが、今回改良したモデルを用いて計算すると最大値は 2,446 kV と従来モデルよりも小さくなる。従って、より精緻な計算を実施するのであれば改良モデルを用いることが望ましいが、従来モデルの方が設計面で厳しめに計算が可能であった。

以上から UHV 鉄構のがいし間電圧を EMTP 解析することが可能であることを示した。

第 5 章「落雷位置標定装置 (LPATS-T) のパフォーマンス評価」では、500 kV 送電鉄塔への雷撃電流直接観測結果との比較により、電磁波による雷放電位置標定装置 LPATS-T の位置標定精度や雷撃電流値推定精度などのパフォーマンス評価を実施した。比較した雷撃はすべて負極性第一雷撃であった。

主な結果を次に示す。

- ① 位置標定誤差は、40 例の比較結果から、平均約 600 m であった。多地点の電磁波受信局の時刻同期に GPS を使用する TOA 方式の雷放電位置標定システムとしては平均的な数値である。
- ② 受信電界強度から推定した電流ピーク値は、ばらつきが大きいものの、40 kA を超える大電流領域では、電界ピークと電流ピークの間にはほぼ線形性が保たれていることがわかった。この電流領域で線形性が確認されたのは世界最初である。負極性第一雷撃電流について、この線形性が確認されたのも、同じく世界最初である。電磁界からの電流推定値と電流実測値の間には 20% ほどの差があったが、これは先行研究におけるば

らつきの範囲内である。電磁界からの電流推定式は、比較的小電流の負極性後続帰還雷撃の観測結果では検証されているが、それを大電流領域の負極性第一雷撃に適用することは不合理ではない。

- ③ 電界波形の波頭部分は、電流波形の立ち上がり部分とほぼ相似であった。帰還雷撃の伝送線路モデルが成立している場合、電流波形と電界波形は相似になる。これまで後続雷撃の波頭部分では、それが成立していることが検証されているが、ステップトリダが先行する負極性第一雷撃の立ち上がり部分においても、伝送線路モデルが成立していると考えられる。

以上の結果から、LPATS-Tの位置標定精度が平均600mであること、送電線の平均径間長が300m程度であることから、鉄塔1基または2基に限定できる。また、20%程度の電流推定精度が期待できることから、事故の有無の推定が可能である。従って、LPATS-Tのデータは、送電線への雷撃位置を遠方から標定し、がいし間電圧を解析できる精度を有していることが分かった。

第6章「UHV 架空送電線雷事故被害の推定手法」では、送電線へ雷撃すると、設備には十分な対策がされているものの、まれに設備被害が発生する場合がある。万が一設備被害が発生した場合には、社会への影響が大きいため、雷事故時には、即時に事故巡視を実施しているのが現状である。そこで、雷事故時の設備被害状況を分析するとともに、給電情報、雷情報、設備情報などから、設備被害有無推定手法を開発した。まず、雷事故の多い66kV送電線において検証し、次にUHV 架空送電線に適用した。

主な結果を次に示す。

- ① 臨界通絡電圧、アーク電流とアーク継続時間、雷撃の極性などの新たな推定基準を提案した。
- ② 今回作成したがいし破損推定基準に基づき、事故巡視要否を推定した結果、178件の検証中、設備被害回数は11回であったが、作成した推定基準によるがいし被害の見逃しはなかった。
- ③ この検討による66kV送電線の雷事故巡視の即時巡視率は65%となり、残りの35%は至近の普通巡視で確認することにより、業務の平準化が可能であることが分かった。
- ④ UHV 架空送電線の雷事故32件の設備被害推定手法を適用した結果、32件の検証中、設備被害回数は架空地線に1回あったが、作成した推定基準による被害の見逃しはなかった。
- ⑤ この検討によるUHV送電線の雷事故巡視の即時巡視率は44%となり、残りの56%は至近の普通巡視で確認することにより、業務の平準化が可能であることが分かった。

以上から、今回提案した送電設備被害推定手法が有効であることが明らかとなり、実際の巡視に適用することが可能となった。

本論文では雷撃によるUHV 架空送電設備の被害推定手法を構築した。この手法により、これまで100%実施していた雷事故巡視を大幅に効率化することが出来た。今後は、さらなる分析により被害推定手法の精度向上が望まれる。本研究の成果が、今後の電力システムの耐雷評価の一助となることを期待する。